DOI: 10.3901/JME.2019.04.218

水下电能传输网络高密度直流变换器设计及实现*

肖 洒 张 锋 李德骏 杨灿军 金 波 陈燕虎
(浙江大学流体传动与机电系统国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 为提高海底观测网络的稳定性, 提出一种海底观测网络的直流高中压变换器电路结构并讨论其动态特性。针对高中压电源变换器输入电压高, 输出功率大的特点, 采用串联输入串联输出和串联输入并联输出相结合的多模块复合结构, 来减小体积并实现模块化设计; 控制上采用提前引入补偿值的电压型 PWM 控制技术, 实现抗干扰能力强和响应速度快等特性; 采用继电器反馈法整定误差放大器的 PI 参数, 减小系统的输出超调电压和稳态波动幅值, 使得该电源变换系统在大负载阶跃下的动态稳定性有所提高。为后续分析系统在启动和负载变化等大信号下的瞬态响应, 建立高中压电源变换器仿真模型。仿真和试验结果表明, 所采用得模块化设计能实现极小体积, 并能达到散热需求, 采用无超调整定规则整定的 PI 参数能极大地减小系统输出超调电压和稳态波动幅值, 使得高中压电源变换器的稳态特性得到提升, 在启动和负载切变过程中均表现出了良好的动态特性。

关键词: 海底观测网; 直流高中压电源变换器; 电路仿真; 供电系统

中图分类号: TM421

Design and Implementation for the Medium Voltage DC-DC Converter (MVC) of Underwater Power Transmission Network

XIAO Sa ZHANG Feng LI Dejun YANG Canjun JIN Bo CHEN Yanhu
(State Key Laboratory of Fluid Power & Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: In order to improve the stability of the submarine observation network, a medium voltage DC-DC converter circuit structure for a submarine observation network is proposed and its dynamic characteristics are discussed. Considering the high input voltage and high output power of the converter, a multi-module composite structure combining series input series output and series input parallel output is adopted to reduce the volume and realize modular design. The voltage-type PWM control technology with advanced compensation value realizes anti-interference ability and fast response. The relay feedback method is used to adjust the PI parameter of the error amplifier, which reduces the output overshoot voltage and steady-state fluctuation amplitude of the system. In order to analyze the transient response of the system under large signals such as startup and load change, a simulation model of the converter is established. The simulation and experimental results show that the modular design can achieve the minimum volume and reach the heat dissipation requirement. The PI parameters under no overshoot tuning rule can greatly reduce the output overshoot voltage and steady state fluctuation amplitude. Finally, the steady state characteristics of the medium voltage converter are improved, and it shows good dynamic characteristics during start-up and load change.

Key words: submarine observation network; medium voltage DC-DC converter; circuit simulation; power supply system

0 前言

交流输电技术成熟, 在早期海底观测网络的建设初期得到了较多的应用, 如美国的长期生态观测网 LEO-15(Long-term Ecosystem Observatory)^[1]、

玛莎葡萄园岛海底观测网 MVCO(Martha's Vineyard Coastal Observatory)^[2-3]以及 2002 年建立在意大利地中海的中微子地中海观测网 NEMO(NEutrino Mediterranean Observatory)一期工程。

交流输电有以下缺点: 交流损耗大, 高压水下变压器体积巨大, 成本高昂。和交流输电相比, 直流输电的损耗小, 而且电缆直流耐压能力是其交流耐压的能力的 4 倍以上^[4], 所需电缆数目也比交流少。因此, 相同输送容量下, 直流电缆的造价比交

* 国家自然科学基金(41676089)、中国浙江省自然科学基金(LY18E090003)和中央高校基本科研经费(2018QNA4005)资助项目。20180330 收到初稿, 20180813 收到修改稿

流电缆低许多。

采用直流恒压输电的海底观测网络有加拿大的维多利亚海底试验网 VENUS(Victoria Experimental Network Under the Sea)^[5], 美国的蒙特雷加速研究系统 MARS(Monterey Accelerated Research System), 以及美国和加拿大联合建设的东北太平洋时间序列海底观测网 NEPTUNE(North East Pacific Time-series Undersea Networked Experiments)加拿大部分^[6], 近几年美国开始研究小型化海底观测网络, 包括 SMART (Science Monitoring and Reliable Telecommunications) 海底观测网络^[7-8], 这也是未来的发展方向。而目前国内直流观测网还处于起步阶段, 多节点、更大水深和缆长的海底观测网还在探索: 2009 年, 同济大学建立了我国首个直流缆系海底观测网络试验站, 设备供电电压 10~48 V, 最大功率为 40 W, 2013 年中科院南海海洋所与浙江大学合作建立了三亚海底观测网络示范系统, 为了突破当时水下远距离输电技术的限制, 主干缆上采用 -10 kV 恒压供电, 单个接驳盒最大功率可达 10 kW, 远高于之前观测网络的接驳盒功率。主接驳盒内通过 DC-DC 将 -10 kVDC 降到 375VDC, 次接驳盒处将 375VDC 转换成 48VDC, 供科学仪器使用, 光电复合缆长 2 km, 布放在 20 m 水深的海底; 2014 年浙江大学在舟山布放的海底观测网络同样采用 -10 kV 的直流恒压输电方式, 最大供电能力可达 10 kW, 布放顺利, 通电启动成功^[9-13]。

本文主要研究内容为海底观测网络的电能传输关键部分——高中压电源变换器的设计和实现。本文研究的高中压电源变换器与前述接驳盒降压系统的主拓扑回路一致, 但研究方向有别。本文主要通过仿真软件, 建立该电源变换器的电气模型, 并进行其在远距离传输电缆下的大负载阶跃的动态特性分析, 并根据仿真结果细微调整了部分反馈回路的 PID 参数, 以使得该电源变换系统在大负载阶跃下的动态稳定性有所提高, 并以此进行了试验对比, 为国内首个 -10 kV 高压海底观测网络输电系统的正常启动和安全运行提供保障。

1 高中压电源变换器总体方案

考虑到高中压电源变换器的输入电压较高, 最大输出功率要求为 10 kW, 输入电压与输出电压之比达到 26.7 倍, 仅通过单个 DC-DC 变换器的拓扑难以实现。并且开关电源电路中, 单个功率开关元件承受的最大电压等于输入电压或者输出电压的数倍, 现有元器件的耐压等级难以满足这样的要求。

因此, 考虑复合变换器。复合变换器是指多个 DC-DC 变换器拓扑串并联, 并采用同一控制环路实现控制的方式^[14]。输出的 375 V 电压属于中压, 可采用输入串联输出串联结构和输入串联输出并联结构相结合, 以减小单个开关元件上承受的电压。采用同一控制环路实现控制的好处是, 控制电路数量不随模块数的增加而增加, 简化了控制环路。

整个高中压电源变换器的结构如图 1 所示。

(1) 每个单模块电路实现 210~47 V 的电能转换。

(2) 主电路二级模块采用 8 个单模块串联输入串联输出, 组成一个 1 650~375 V 模块。

(3) 主电路一级模块采用 6 个二级模块串联输入并联输出, 输出端接法为输出电容并联式。

(4) 所有主电路模块用统一控制环路进行控制。

按整个高中压电源变换器最大输出功率 10 kW 来算, 每个二级模块功率约为 1.660 kW, 单模块功率约为 210 W。

图1 高中压电源变换器的总体结构

多模块串并联的复合转换器, 模块间的均压和均流是必须考虑的问题, 根据 VATCHE 等的研究, 只要各模块的参数尽可能一致, 这种输入串联输出并联的结构具有较好的均压和均流稳定性^[15-16]。

高中压电源变换器的核心部分为单模块电路和控制电路。单模块电路用于功率的传递, 主要由输入滤波电路、DC-DC 变换器、输出整流电路和输出滤波电路组成。控制电路主要由采样电路、误差放大电路、PWM 控制电路和开关管驱动电路等环节组成。图 2 所示为典型的 PWM 控制的开关电源闭环负反馈电路。

图2 典型的开关变换器闭环反馈环路

另外,开关电源有电流连续和电流断续两种工作模式。其中,电流断续模式容易导致大负载变化情况下的系统不稳定。由于转换器的负载变化范围较大,需要增加假负载或同步整流,使电路一直工作在电流连续模式。

2 高中压电源变换器核心电路

2.1 单模块电路方案

变换器拓扑方面,选用隔离式变换器拓扑,变压器能够隔离输入和输出,能够抑制噪声并且更加安全,这种起隔离作用的变压器匝数比一般为 1:1,因为变压器匝数比为 1:1,可以获得最优的耦合系数和传输效率^[17]。

变换器拓扑方面选用双管正激变换器,该变换器拓扑与其它变换器相比,具有以下特点:每个开关管上承受的电压应力减半,使得相同的开关元件的可靠性和寿命增加;不需要复位电路,且开关管关断时能量能够回馈到电源,效率更高。双管正激 DC-DC 变换器的主电路如图 3 所示。

图 3 双管正激变换器单模块电路

2.2 PWM 控制电路方案

由于电压型 PWM 控制具有抗干扰能力强,占空比调节不受限制,调试相对容易等优点,在开关电源控制中有着广泛的应用。

电压型 PWM 控制的原理如图 4 所示,通过采样放大得到的反馈信号 V_{FB} 和基准电压 V_{ref} 比较得到电压误差放大信号 V_e ,再同 PWM 比较器中的锯齿波信号比较,输出占空比变化的方波驱动信号。选择提前引入补偿值的电压型 PWM 控制器,可以使电压型控制的瞬态响应变快。

图 4 电压型 PWM 控制原理图

由于主电路电压较高,采用带隔离的驱动电路。图 5 所示为常用的带隔离的 MOSFET 驱动电路。

图 5 带隔离的 MOSFET 驱动电路

为了保证足够的驱动能力,用一个驱动电路驱动一个 MOS 管的方式,为了保证足够的余量,选择可输出 9 A 峰值的 MOSFET 驱动器 MIC4421。利用隔离变压器实现多路输出,并保证四个 MOS 管导通的时序性;加入互补级输出进行功率放大,提高可靠性。

2.3 误差放大器

误差放大器对系统的动态响应影响很大,是整个控制回路设计的重点。PWM 集成控制芯片内部的误差放大器不可调,所以我们采用芯片外部搭建误差放大器的方式。

常用的 I 型、II 型和 III 型误差放大器,分别对应 PID 控制中的 P 控制、PI 控制和 PID 控制。I 型误差放大器对于误差只有比例作用,输出会有静差。II 型误差放大器中积分作用的引入,能够保证稳态输出没有静差(图 6)。III 型误差放大器中微分可能会引入较强的高频噪声,这是实际系统中不希望看到的。这里,选择 II 型误差放大器。

图 6 II 型误差放大器

由于继电反馈法参数整定原理简单,操作方便,用该方法对 II 型误差放大器的 PI 参数进行整定。

继电反馈法中系统有两个状态:测试状态和控制状态。测试状态下,通过调整继电反馈的幅值来使系统产生一个稳定的振荡,从而获得系统的振荡频率和幅值,然后按 ZN 整定公式计算 PID 参数^[18]。控制状态下,运用计算得到的 PID 参数来控制系统。

原始 ZN 整定规则在控制工程实践中的应用很广泛,但整定结果往往趋于欠阻尼,超调量过

大。所以,经常采用保守方法——不产生超调整定规则。

经过多次仿真试验,在继电振荡幅值 $d=3.64\text{ V}$ 时,得到如下为仿真得到图 7 所示的极限振荡,极限振荡幅值 $a=340\text{ V}$,临界振荡周期 $T_u=4\text{ ms}$ 。

图 7 继电反馈仿真输出波形图

3 单节点系统特性的仿真分析

3.1 单节点系统的启动特性分析

系统的启动特性主要是指高中压电源变换器启动时输出端电压的超调大小、到达稳定状态的时间快慢,以及输入端的电压变动。图 8 所示为单节点电能传输系统的结构示意图。单节点系统的仿真模型包括:① -10 kV 的直流恒压电源(模拟岸基电源);② 75 km 传输电缆的仿真模型;③ 高中压电源变换器的仿真模型;④ 模拟负载。为了简化系统,次级接驳盒和科学仪器用纯阻性负载模拟。而对于岸基电源,高中压电源变换器(以下称为节点)就是负载。因此,节点启动时,也会引起岸基电源和电缆上的电压变化,主要关注电缆末端的电压变化会不会触发节点输入电压的保护。

图 8 单节点电能传输系统的结构示意图

岸基电源供电电压为 -10 kV ,在 15 ms 的时候启动高中压电源变换器,分别对系统轻载启动(0.1 kW)、半载启动(5 kW)和满载启动(10 kW)的过程进行仿真,所得到的节点输出电压波形和输入端电压变化细节见图 9、10。

图 9 单节点系统启动仿真的节点输出电压

图 10 单节点系统启动仿真的节点输入端电压

从图 9 中可以看出,由于误差放大器在进行 PI 参数整定时,选择了无超调的整定规则,即使是轻载启动,输出电压也不会产生超调。另外,输出电压的上升时间和调整时间受负载的影响较小,从开关闭合到上升到输出电压到达 $375\pm 4\text{ V}$ 用时 45 ms 。启动过程结束后,高中压电源变换器的输出电压稳定在 375 V 左右,稳态电压波动的幅值随着负载的增大略有增大。负载 10 kW 时的稳态电压波动幅值为 2 V ,小于要求的 4 V 。

从图 10 中可以看出,在高中压电源变换器启动时,输入端电压会有一个下降的瞬间,下降的峰值约为 450 V ,这是因为高中压电源变换器启动瞬间需要较大的电流,而岸基电源的输出滤波电感上的电流不能突变,因此岸基电源的输出滤波电容和 75 km 缆上的对地电容放电,产生了这个下降的尖峰。随后,岸基电源输出电感上的电流增大,提供了高中压电源变换器启动所需的电流,电容不再放电,缆上电压回升。但由于缆上经过的电流增大,缆上的压降也变大。

表 1 中是 -10 kV 启动过程时高中压电源变换器输入端的电压变化值和稳定值。可见,岸基电源输出的 -10 kV 经过 75 km 电缆到达高中压电源变换器

的输入端时电压依然能在 9 900 V 以上。并且负载越大, 稳态时缆上流经的电流越大, 缆上压降越大。启动瞬间的压降约为 500 V, 在系统的安全工作范围内, 能够保证系统的正常启动。

表 1 -10 kV 启动时不同负载下的电缆末端电压

启动负载/ kW	75 km 缆末端电压/V			
	极值	峰峰值	稳态值	
0.1	-9 591	-10 140	549	-9 990
5	-9 566	-10 134	568	-9 952
10	-9 558	-10 129	571	-9 913

根据电路理论, 缆上稳态压降 $\Delta U = IR$ 。以满载时为例, 负载 10 kW 时, 岸基电源输出电流 $I = 1.16$ A, 75 km 缆上电压 $U_1 = 10^4 - 1.16 \times 75 = 9\,913$ V。可见, 计算值和仿真值一致, 也证明了仿真模型的可靠性。

3.2 单节点系统的负载跃变特性分析

负载跃变特性主要指系统在负载突然变化时输出电压波动的大小和恢复稳定的时间快慢。当负载突然变大时, 因为输出电感电流不能突变, 因而不能迅速响应负载上的电流需求, 只能由输出电容提供这个迅速增加的电流满足负载。输出电容上的这个瞬间放电, 会引起输出电压的瞬间跌落。然后, 由于负反馈作用, 使得输出电压经过一段时间的波动后又回到稳态值。当这个负载的跃变过大时, 系统会陷入不稳定状态。当负载突然变小时, 电压的变动相反。

仿真时, 设置岸基供电电压为 -10 kV, 在 10 ms 的时候启动高中压电源变换器, 将负载在轻载(0.1 kW)、半载(5 kW)和满载(10 kW)之间进行变动, 负载均为纯电阻负载。高中压电源变换器的输出电压如图 11~13 所示, 75 km 缆末端在负载跃变时的变化如图 14~16 所示。图 11、14 所示仿真启动负载为 0.1 kW, 在 60 ms 切换负载为 5 kW, 在 80 ms

切换负载为 10 kW。图 12、15 所示仿真启动负载为 10 kW, 在 60 ms 切换负载为 5 kW, 在 80 ms 切换负载为 0.1 kW。图 13、16 所示仿真启动负载为 0.1 kW, 在 60 ms 切换负载为 10 kW, 在 80 ms 切换负载为 0.1 kW。

图 12 单节点系统负载跃变仿真的节点输出电压
(负载 10 kW→5 kW→0.1 kW)

图 13 单节点系统负载跃变仿真的节点输出电压
(负载 0.1 kW→10 kW→0.1 kW)

图 11 单节点系统负载跃变仿真的节点输出
(负载 0.1 kW→5 kW→10 kW)

图 14 单节点系统负载跃变仿真的节点输入端电压
(负载 0.1 kW→5 kW→10 kW)

图 15 单节点系统负载跃变仿真的节点输入端电压
(负载 10 kW→5 kW→0.1 kW)

图 16 单节点系统负载跃变仿真的节点输入端电压
(负载 0.1 kW→10 kW→0.1 kW)

每个动态过程中高中压电源变换器输出端电压波动的峰峰值、极值以及输入端电压的初始值、瞬态过程的峰峰值和稳态值见表 2。

表 2 负载跃变仿真中关键点的电压波动

仿真 编号	负载跃变/ kW	输出电压波动/V		75 km 缆末端电压/V		
		峰峰值	极值	极值	峰峰值	稳态值
1	0.1~5	28	340	-9 933	60	-9 954
2	5~10	27	341	-9 889	65	-9 913
3	10~5	28	394	-9 980	67	-9 952
4	5~0.1	28	399	-10 018	66	-9 990
5	0.1-10	52	323	-9 857	139	-9 913
6	10-0.1	50	420	-10 040	126	-9 990

从仿真结果中可以看出, 负载变大, 节点输出电压和输入端电压都会有一个下降的尖峰, 持续几毫秒后回复稳态; 负载变小, 输出电压和电缆末端电压都会有一个上升的尖峰, 和预期的一致。从试验 1、5 的对比可以看出, 负载跃变值越大, 节点输出电压和输入端电压波动越大。但总体上, 系统的抗负载扰动性较好, 即使是从空载到满载, 或者从满载到空载的负载跃变, 都不会引起高中压电源变

换器输入或输出的过压或欠压保护。

4 高中压电源变换器的测试

为了验证仿真的准确性, 按照图 8 所示的系统结构建立了试验平台, 图 17 为高中压电源变换器和电子负载, 图 18 为 200 km 海底电缆的等效模型, 图 19 为岸基系统, 包括岸基电源等。

图 17 高中压电源变换器以及电子负载实物图

图 18 海底电缆模型

图 19 岸基系统

4.1 单节点启动特性试验

将岸基电源设置为-8 kV, 分别对 281 W 轻载启动和 5 kW 半载启动时的动态过程进行测量。示波器 Ch1 为 375 V 输出信号, 电压显示比 1:1; Ch4 为 200 km 末端的电压信号, 显示比为 1:2。

从图 20、21 分析, 在启动的初始阶段, 输出电压有一定的波动, 然后缓慢上升, 也会引起输入电压的下降, 这和仿真结果一致。但是和仿真结果相比, 实际波形的超调较大, 对输入端的影响也较大, 这可能是因为建立仿真模型时简化了辅助电源, 启

动电路等模型,而这些会影响节点的输出波形。整体上可以认为试验和仿真一致,单节点系统可以正常运行。

图20 单节点轻载启动

图21 单节点半载启动

4.2 单节点负载切变试验

测试负载在 0.28 kW、5 kW、8 kW 间切变时电压的动态波形。试验结果如图 22~24 所示。

图22 负载切变波形图 0.28~5 kW

从图 22~24 可以看出试验结果和仿真结果基本一致。实际测得的电压波动值大于仿真值,原因与 4.1 节中的一样,但由于系统设计时留有足够的安全裕量,系统仍能正常工作。

图23 负载切变波形图 0.28~8 kW

图24 负载切变波形图 5~0.28 kW

5 结论

(1) 针对海底观测网络,设计一种高中压电源变换器。结果表明所设计的高中压电源变换器能够满足 375 ± 4 V 的输出电压要求,且在负载变动时表现出了良好的动态特性。

(2) 在高中压电源结构方面,采用串联输入串联输出和串联输入并联输出相结合的多模块复合结构,来减小体积并实现模块化设计,只要单模块间的参数尽可能一致,就能自动实现均压均流。

(3) 在系统中引入误差放大器进行 PI 控制,并采用了无超调整定规则整定 PI 参数。结果表明,采用无超调整定规则整定的 PI 参数,可以有效降低系统的输出超调电压和稳态波动幅值,为国内首个 -10 kV 高压海底观测网络输电系统的正常启动和正常运行提供保障。

(4) 研究结果将应用于海底观测网电能传输系统,对海底观测网技术的发展有着重要的意义。但长距离、多节点海底观测网在系统启动瞬间可能在传输缆上产生较大的电压波动,带来整个系统的失稳,因此后续工作将对广域电能分配系统的稳定性分析展开进一步的深入研究。

参 考 文 献

- [1] AUSTIN T, EDSON J, MCGILLIS W, et al. The martha's vineyard coastal observatory: A long term facility for monitoring air-sea processes[C]//Oceans. Providence USA: IEEE, 2000, 3: 1937-1941.
- [2] COCIMANO R. A comparison of AC and DC power feeding systems based on the NEMO experiences[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2009, 602(1): 171-173.
- [3] MAYER L A, RAYMOND R, GLANG G, et al. High-resolution mapping of mines and ripples at the Martha's Vineyard coastal observatory[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2007, 32(1): 133-149.
- [4] AIK D L H, ANDERSSON G. Analysis of voltage and power interactions in multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 816-824.
- [5] DEWEY R, ROUND A, MACOUN P, et al. The VENUS cabled observatory: Engineering meets science on the seafloor[C]//Oceans. Aberdeen, Scotland: IEEE, 2007: 1-7.
- [6] BARNES C R, BEST M M R, JOHNSON F R, et al. Challenges, benefits and opportunities in operating cabled ocean observatories: Perspectives from NEPTUNE Canada[C]//Underwater Technology. Tokyo, Japan: IEEE, 2011: 1-7.
- [7] TILMANN F, HOWE B, BUTLER R, et al. Proposal for using commercial submarine telecommunications cables for monitoring earthquakes and tsunamis—the SMART cable concept[C]//EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, Vienna, Austria: 2017.
- [8] HOWE B, AUCAN J, TILMANN F, et al. Submarine cable systems for future societal needs[R]. ITU-T Workshops and Seminars, 2016.
- [9] 杨灿军, 张锋, 陈燕虎, 等. 海底观测网接驳盒技术[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 172-179.
YANG Canjun, ZHANG Feng, CHEN Yanhu, et al. Technologies of junction box for seafloor observation network[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 172-179.
- [10] 陈燕虎, 杨灿军, 李德骏, 等. 海底观测网接驳盒电源散热机理研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 121-127.
CHEN Yanhu, YANG Canjun, LI Dejun, et al. Research on heat dissipation mechanism of the power supply in seafloor observation network junction box[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 121-127.
- [11] CHEN Yanhu, YANG Canjun, LI Dejun, et al. Study on 10 kVDC powered junction box for a cabled ocean observatory system[J]. China Ocean Engineering, 2013, 27(2): 265-275.
- [12] LI Dejun, WANG Jun, FENG Jianshe, et al. Study and design of a heat dissipation system in a junction box for chinese experimental ocean observatory network[J]. Marine Technology Society Journal, 2016, 50(2): 63-74.
- [13] WANG Jun, LI Dejun, YANG Canjun, et al. Key technologies of junction boxes for Chinese experimental ocean observatory networks[C]//Oceans. Shanghai, China: MTS, 2016: 1-5.
- [14] LU S. Infrastructure, operations, and circuits design of an undersea power system[D]. Washington, USA: University of Washington Electrical Engineering, 2006.
- [15] CLARK A M, KOCAL D M, MARTINDALE K, et al. Numerical modeling and Hardware-in-the-Loop simulation of undersea networks, ocean observatories and offshore communications backbones[C]//OCEANS. Biloxi, MS, USA: IEEE, 2010: 1-11.
- [16] KIM J W, YOU J S, CHO B H. Modeling, control, and design of input-series-output-parallel-connected converter for high-speed-train power system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(3): 536-544.
- [17] VORPERIAN V. Synthesis of medium voltage dc-to-dc converters from low-voltage, high-frequency PWM switching converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(5): 1619-1635.
- [18] 叶岚. 基于继电反馈的 PID 控制器的参数整定[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
YE Lan. PID controller tuning based on relay-feedback test[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University.

作者简介: 肖洒, 男, 1993 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机械电子、海底观测网络。

E-mail: sxiao@zju.edu.cn

张锋(通信作者), 男, 1988 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为机械电子、海底观测网络。

E-mail: fengzh@zju.edu.cn